

SPREJEM IN UPORABA LOKALNIH LETALSKIH MERITEV PRI NAPOVEDOVANJU VREMENA

¹Marko Hrastovec, ²Benedikt Strajnar, ³Franc Solina

¹Kontrola zračnega prometa Slovenije, d. o. o., marko.hrastovec@sloveniacontrol.si

²Agencija Republike Slovenije za okolje, benedikt.strajnar@rzs-hm.si

³Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, franc.solina@fri.uni-lj.si

Izvleček

Letala med letom neprestano merijo zračni tlak, temperaturo in veter. Ti podatki so zelo uporabni za spremljanje in napovedovanje vremena. V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so začeli organizirano zbirati te podatke s pomočjo radijskih in satelitskih povezav pod okriljem svetovne meteorološke organizacije, kar pa je žal omejeno na nekaj letalskih družb. S pojavom radarjev nove generacije Mode-S se je odprla možnost zajema meteoroloških podatkov prek radarjev. V Sloveniji smo prvi vzpostavili pot prenosa teh meritev z letal prek radarjev Mode-S do meteorološke službe. Primerjave kažejo, da so meritve v povprečju zelo kakovostne in imajo pozitiven vpliv na kratkoročno vremensko napoved. Opisani način pridobivanja in sprejema meteoroloških meritev prek radarjev Mode-S ter izmenjave podatkov predstavlja vzorčen, a za zdaj v svetu večinoma neizkoriščen primer možnosti učinkovitega sodelovanja upravljalcev letalskih radarjev in meteoroloških služb. Našo izkušnjo promoviramo med mednarodnimi institucijami, saj menimo, da ima velik potencial za izboljšave napovedi vremena in varnosti letalskega prometa v svetovnem merilu.

Ključne besede: letala, radarji Mode-S, meritve ozračja, vremenska napoved.

Abstract

Transmission and Usage of Local Airborne Measurements for Weather Forecasts

Aircraft measure and monitor air pressure, temperature and winds all the time. These data are very useful for weather forecasting. In seventies organized collection via radio and satellite links was started under World Meteorological Organization. Unfortunately it is still limited to a few airline companies. New Mode-S radars are providing possibility to gather meteorological data. The path from aircraft via radar to air traffic control and further to meteorological agency was first established here in Slovenia. Analysis shows that measurements are of very good quality and have positive impact on short term forecasts. This example of acquiring and transmitting meteorological data via Mode-S radars shows an efficient cooperation between air navigation and meteorological services. Unfortunately it is not used elsewhere and we are promoting it because we believe there is a great potential for weather forecast improvements and air traffic safety on a global scale.

Key words: aircraft, Mode-S radars, atmosphere measurements, weather forecast.

1 UVOD

Ljudje običajno želimo čim večjo predvidljivost v našem širšem okolju. Zato si tudi želimo čim bolj zanesljive vremenske napovedi, da bi lažje načrtovali svoje dejavnosti. Računsko zasnovani modeli za napovedovanje vremena se sicer stalno izpopolnjujejo, toda za boljše napovedi ti modeli potrebujejo tudi čim več natančnih podatkov o trenutnem stanju v celotnem preseku atmosfere, ne

le na zemeljski površini. Zato so bile v preteklosti še posebno dragocene vremenske postaje na izpostavljenih gorskih vrhovih, kot je npr. vremenska postaja na Kredarici. Toda to ni dovolj. Podatke o temperaturi, vetru, zračnem pritisku itd. potrebujemo še višje v ozračju in čim bolj enakomerno razporejene po celotnem področju, za katerega napovedujemo vreme.

S pomočjo satelitov je mogoče na daljavo pridobiti vedno več informacij iz ozračja, vendar so te informacije manj natančne in zanesljive, kot če lahko spravimo tipala na samo mesto meritve. Tradicionalni način opravljanja takih meritev je s pomočjo vremenskih balonov, ki tipala dvignejo skozi ves presek ozračja in s pomočjo radijske zveze sporočajo meritve. Druga možnost so letala, ki so opremljena z osnovnimi vremenskimi tipali že zaradi lažjega opravljanja svoje glavne naloge. Da bi vremenoslovci lahko prišli do vremenskih meritev na letalih, je Mednarodna meteorološka organizacija vzpostavila program AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay), ki omogoča, da lahko letala, ki so vključena v program, s pomočjo posebne opreme sporočajo meritve prek radijskih ali satelitskih zvez. V ta program je zaradi cene vključen zelo majhen delež letal. V program AMDAR je vključenih vsega skupaj 39 letalskih družb. Od tega je ena tretjina evropskih.

Nova tehnična možnost se je pokazala z novo generacijo radarjev Mode-S, ki omogočajo izmenjavo velikega števila podatkov med letali in kontrolnimi centri. Veliko število letal kontrolnemu centru med drugimi podatki sporoča tudi vremenske meritve. Te vremenske informacije so se še pred nedavnim preprosto izgubile oziroma jih niso uporabljali za napovedovanje vremena. V Sloveniji smo bili prvi, ki smo vzpostavili sistem, ki iz centra za kontrolo letalskega prometa vremenske podatke tekoče pošilja v center za napovedovanje vremena. Zato smo primerjali meritve, pridobljene iz programa AMDAR, z meritvami, pridobljenimi s pomočjo radarjev Mode-S (Strajnar, 2012b), in raziskovali, kako najbolje pripraviti vremenske podatke, pridobljene s pomočjo radarjev Mode-S za nadaljnjo uporabo v kontroli zračnega prometa in za napovedovanje vremena (Hrastovec & Solina, 2013).

V prispevku poročamo najprej o zajemu meteoroloških podatkov z radarji Mode-S in nato o njihovi uporabi za napovedovanje vremena. Prvi rezultati rutinske uporabe teh podatkov kažejo, da meritve Mode-S izboljšajo kratkoročno napoved vremena. Prispevek sklenemo z razpravo o širših vidikih tega projekta.

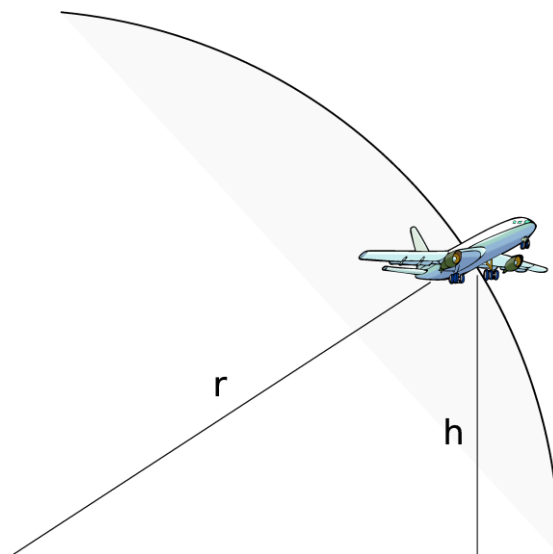
2 ZAJEM METEOROLOŠKIH PODATKOV Z RADARJI MODE-S

2.1 O radarjih

V grobem ločimo dve vrsti radarjev za letalske namene. Prva vrsta so primarni radarji, kot si jih predstavlja večina ljudi. Ti beležijo odboje radijskih signalov s površine letala. Žal pa s temi radarji ne moremo določiti natančnega položaja letala v zraku. Za natančno določitev potrebujemo še podatek o višini. Za ta namen uporabljamo tako imenovane sekundarne radarje. Sekundarni radar odda radijski signal, na katerega odgovori naprava v letalu, ki jo imenujemo transponder. Najpomembnejša podatka, ki ju vračajo radarjem vsa letala v civilnem zračnem prometu, sta odgovor Mode-A in Mode-C. Mode-A je štiristevilčna osmiška koda, ki jo je nastavil pilot po navodilih kontrolorja zračnega prometa. Mode-C odgovor pa je podatek o višini letala.

Podatek Mode-A enolično določa letalo v zračnem prostoru in brez njega ne bi mogli ločiti letal med seboj. Brez podatka Mode-C pa ne bi mogli točno določiti položaja letala. Radar lahko ugotovi

smer, v katero je obrnjen, ko je zaznal letalo in oddaljenost letala. Ne more pa vedeti, na kateri višini se letalo nahaja brez vrednosti Mode-C. Na sliki 1 vidimo krožnico s polmerom r , na kateri bi se lahko nahajalo letalo, če ne bi imeli podatka o njegovi višini h . Ker pa podatek o višini prejmemo s sporočilom Mode-C, je položaj letala enolično določen.



Slika 1: Položaja letala ne moremo enolično določiti brez višine (h).

Radarji Mode-S (Mode Select) so najnovejša generacija sekundarnih radarjev, ki lahko z enoličnim 24-bitnim naslovom letala zahtevajo odgovor le od tega letala in ne od vseh, ki »slišijo« zahtevo. Skupaj z ustrezno opremo na letalu (transponder Mode-S) so sposobni od letala pridobiti veliko več podatkov kot le višino in identifikacijo.

Radar Mode-S lahko od letala pridobi vsebino 56-bitnih registrov, ki vsebujejo različne informacije. Celoten seznam registrov je velik in je naveden v ICAO-dokumentu Aeronautical Communications Annex 10 Volume III (ICAO, 1995). Dva od registrov BDS sta namenjena vremenskim podatkom, ki jih senzorji na letalu zaznavajo in merijo. Radar Mode-S, postavljen na letališču Jožeta Pučnika, iz množice možnih registrov trenutno zajema:

- BDS 4,0 – Selected vertical intention,
- BDS 4,4 – Meteorological routine air report,
- BDS 4,5 – Meteorological hazard report,
- BDS 5,0 – Track and turn report,
- BDS 6,0 – Heading and speed report.

Register, ki vsebuje najpomembnejše podatke o atmosferi, je BDS 4,4 – Meteorological routine air report. Ta register vsebuje:

- hitrost vetra (wind speed),
- smer vetra (wind direction),
- temperaturo zraka (static air temperature),
- turbulenco (turbulence),
- relativno vlažnost (humidity).

Trenutno približno šest odstotkov letal vrača podatke o vetru in temperaturi. Kljub razmeroma majhnemu odstotku je količina teh podatkov še vedno velika v primerjavi z drugimi meritvami. Žal letala ne poročajo o turbulenci in relativni vlažnosti.

2.2 Letalske meritve

Letala so opremljena s tipali, ki posadki omogočajo varno letenje. Prvo od tipal, pomembnih za nas, je tipalo za merjenje pritiska, iz katerega letala izračunajo svojo višino. Natančno izmerjena višina je bistvenega pomena za varno letenje, saj zagotavlja, da letala letijo na različnih višinah, kjer se ne morejo srečati. S točno višino lahko s pomočjo radarja izračunamo položaj letala in s tem položaj ter višino ostalih zajetih meritev.

Kombinacija tipal za merjenje zračne hitrosti (airspeed), talne hitrosti (groundspeed) in kompasa omogoča letalu, da izračuna veter. Zračno hitrost letalo izmeri s Pitojevo cevjo. S pomočjo inercialnih tipal za merjenje pospeškov ali globalnega pozicijskega sistema (GPS) meri talno hitrost. S pomočjo kompasa ter primerjave zračne in talne hitrosti letalo lahko izračuna smer in hitrost vetra, tako da vektorsko odšteje zračno hitrost od talne hitrosti. Vsa letala so opremljena tudi s tipali za zunanjo temperaturo. Z njihovo pomočjo popravljajo meritve zračne hitrosti in dajejo posadki pomembne informacije.

Obstaja še mnogo drugih meritev, a naj omenimo samo še nagib letala. Če je letalo med manevrom (npr. zavojem) preveč nagnjeno, meritvam vetra ne moremo zaupati. Takrat jih zavržemo in obdržimo le temperaturo.

2.3 Zajem, hranjenje in posredovanje podatkov

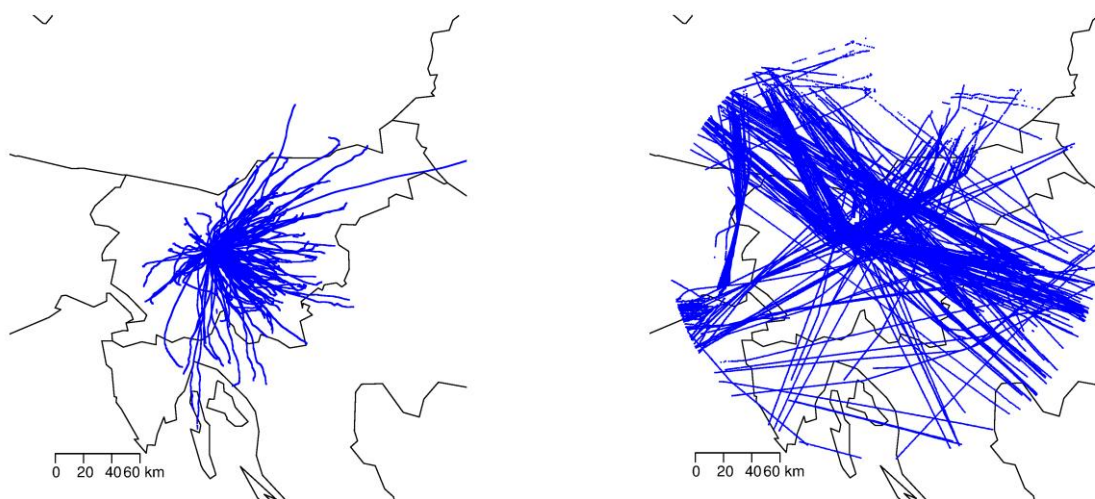
Prvi radar Mode-S je v uporabi v Sloveniji od leta 2008. Obračalni čas tega radarja na letališču Jožeta Pučnika je štiri sekunde. To pomeni, da vsake štiri sekunde dobimo nov položaj letala in vse meritve, ki jih javlja transponder. Poudariti želimo, da smo z minimalnimi vložki enega strežnika realizirali zajem, hranjenje, posredovanje in uporabo teh meritev. Na kontroli zračnega prometa Slovenije te podatke redno posredujemo Agenciji Republike Slovenije za okolje in smo s tem prvi v svetu vzpostavili tako pot zajema in uporabe letalskih meritev v meteorološke namene.

V bližnji prihodnosti pričakujemo nadgradnje še nekaterih radarjev na Mode-S, prek katerih bomo prav tako lahko dobivali vremenske meritve. Tudi te bomo obdelovali na enak način tako rekoč brez dodatnih stroškov.

3 UPORABNOST PODATKOV MODE-S V METEOROLOGIJI

3.1 Meteorološke meritve v ozračju

Za merjenje meteoroloških količin v ozračju tradicionalno uporabljamo vertikalne sondaže. To so meritve vetra, temperature in vlažnosti s pomočjo sonde na posebnih dvigajočih se balonih, napolnjenih s helijem. Te meritve so natančne, vendar pa zaradi cene tudi razmeroma redke (v Ljubljani se npr. izvajajo le enkrat dnevno).



Slika 2: Primerjava geografske razpršenosti sondažnih in letalskih meritev

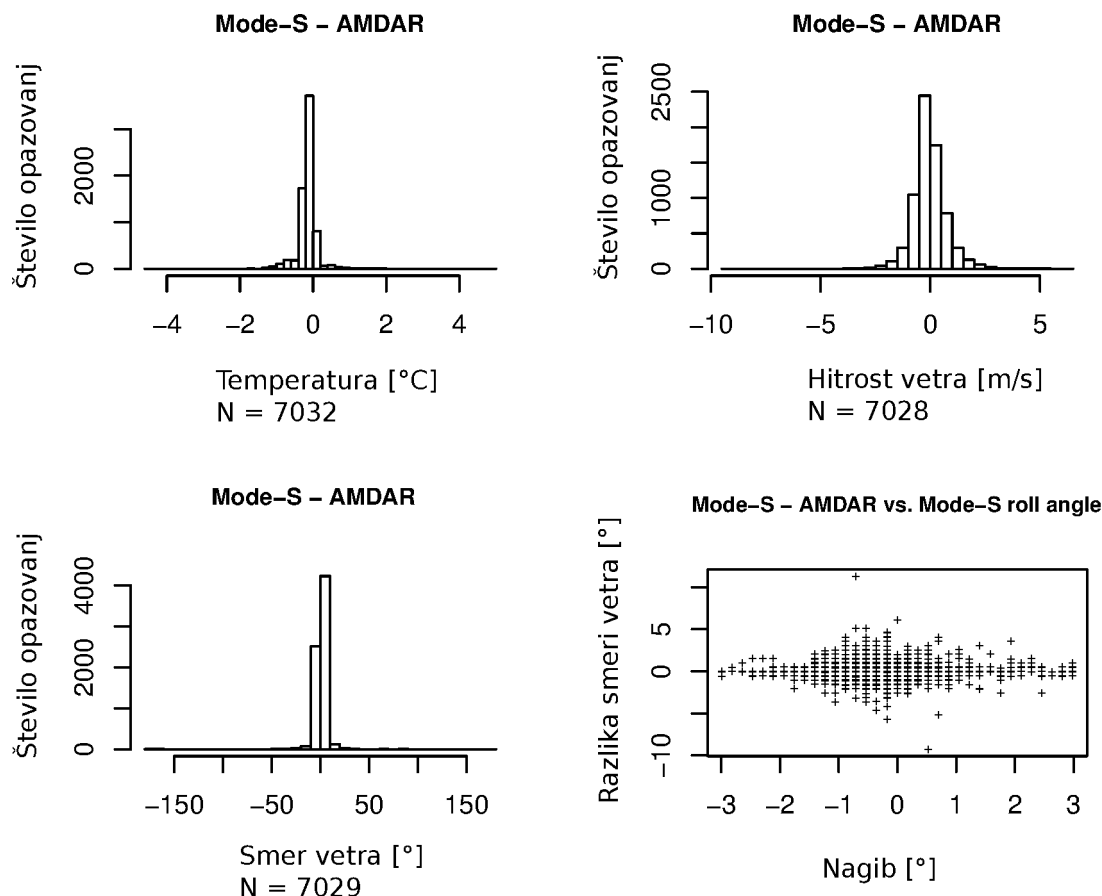
Naslednja skupina so letalske meritve. Poleg že opisanega sistema prenosa podatkov prek Mode-S v meteorologiji že dolgo uporabljamo sistem AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) (AMDAR, 2003). Prek posebne opreme na določenih letalih (njihov delež je majhen) zbirajo meteorološke podatke in jih prek radijskih ali satelitskih povezav pošiljajo v zbirne centre ter naprej v mednarodno meteorološko izmenjavo. Pri nas je nekaj teh podatkov običajno na voljo v višjih slojih ozračja, kjer potekajo preleti prek Slovenije. V spodnjih slojih ozračja teh meritev ni, saj na ljubljansko letališče redno ne pristaja nobeno letalo z vgrajenim sistemom AMDAR.

Zadnja in zelo pomembna skupina so satelitske meritve. Veliko meritev z različnih satelitov je na voljo ves čas. V primerjavi s prej omenjenima skupinama opazovanj so te meritve nekoliko manj natančne, saj vsebujejo akumulirano informacijo o stanju ozračja. Njihovo uporabo otežujeta tudi pokritost neba z oblaki in prisotnost padavin.

3.2 Kakovost Mode-S meritev

Da bi preverili kakovost novih meritev prek sistema Mode-S, je bila najprej opravljena primerjava z meritvami AMDAR (v zgornjih slojih ozračja) ter z radiosondažnimi meritvami. Pomembna je zlasti primerjava s podatki AMDAR, saj meritve izvirajo iz istih instrumentov kot Mode-S, a se zbirajo in obdelujejo na drugačen način, imajo pa tudi zagotovljeno kontrolo kakovosti. Primerjava Mode-S z zgoraj opisanimi meritvami je bila izvedena za obdobje devetih mesecev (Strajnar, 2012b). Pri iskanju parov opazovanj je med opazovanji AMDAR in Mode-S, ki so bila pred tem rahlo časovno zglajena, dovoljena horizontalna razdalja 5 km in vertikalna separacija 100 m. Ugotovljeni standardni odklon razlik je bil 0,35 °C pri temperaturi, 0,8 m/s pri hitrosti vetra in manj kot 10 stopinj za smer vetra. Razsip odstopanj prikazuje slika 3. Rezultati kažejo, da so meritve Mode-S v povprečju kakovostne in da ne vsebujejo pomembnih sistematskih napak glede na AMDAR. Pri primerjavi s sondažnimi meritvami je bila dovoljena horizontalna razdalja med

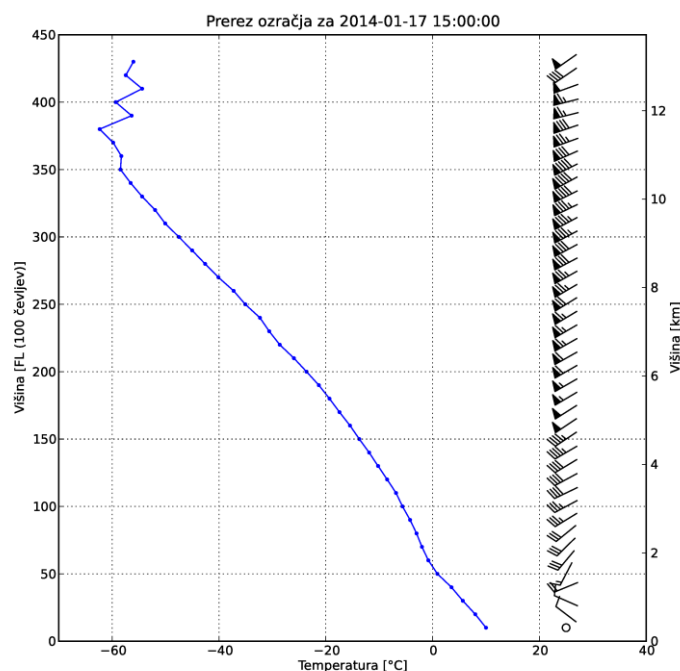
paroma opazovanj povečana na 25 km, s čimer se da pridobiti dovolj parov istoležnih opazovanj. Tu so bile razlike večje. Standardni odklon je bil 1,7 °C pri temperaturi, 3 m/s pri hitrosti vetra in 25 stopinj pri smeri vetra, vendar še vedno v skladu s rezultati podobnih študij (npr. Schwartz & Benjamin, 1995). Spet so bile sistematske razlike zanemarljive. K večjim standardnim odklonom napak seveda znatno prispeva tudi vremenska variabilnost znotraj dovoljene razdalje. Obe primerjavi dokazujeta uporabnost podatkov Mode-S v meteorološke namene.



Slika 3: Primerjava podatkov Mode-S in AMDAR: prikazane so razporeditve razlik za temperaturo, smer in hitrost vetra, poleg tega pa še odvisnost razlik v smeri vetra od nagiba letala, ki bi bil lahko vir napake v podatkih.

3.3 Uporaba za spremljanje vremena

Podatke Mode-S je pri rutinskem spremljanju in napovedovanju vremena mogoče uporabiti kot alternativno vertikalno sondažo. V eni oz. nekaj urah je podatkov običajno dovolj, da izdelamo vertikalni profil meteoroloških količin v okolici ljubljanskega letališča. Slika 4 prikazuje primer povprečnega profila temperature in vetra v treh urah. Profile je mogoče še izboljšati z uporabo poenostavljenega Kalmanovega filtra (Hrastovec & Solina, 2013), pri čemer nove meritve kombiniramo s predhodno izdelanim profilom.



Slika 4: Primer vertikalnega profila ozračja dne 17. 1. 2014 ob 15:00 UTC, zajetega z letal

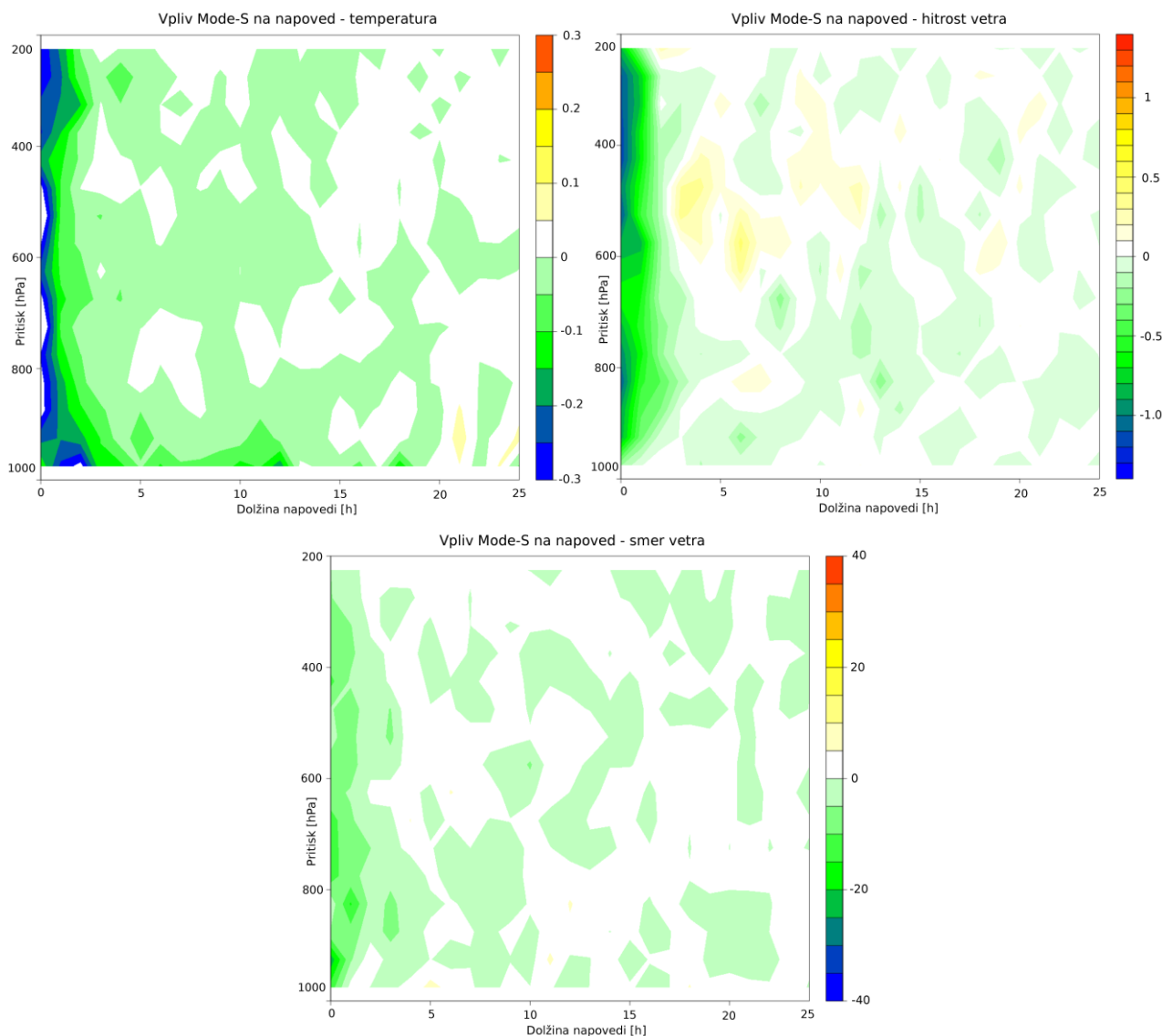
Profili ozračja so pri praktičnem napovedovanju vremena najbolj pomembni za določanje višine inverznih plasti in s tem oblačnih slojev ter v poletnem času za določanje stabilnosti ozračja, ki igra ključno vlogo pri nastanku neviht.

3.4 Uporaba v numeričnem meteorološkem modelu ALADIN

V Sloveniji kratko- in srednjeročno napoved (za do tri dni vnaprej) pripravljamo z meteorološkim modelom ALADIN. Model vsakih nekaj ur (trenutno 6, eksperimentalno vsake 3 ure) analizira stanje vremena na modelskem območju, ki zajema večji del osrednje Evrope. Pri tem s postopkom asimilacije v model vključuje vsa dostopna opazovanja (poleg že naštetih atmosferskih še talne meritve), s čimer tridimenzionalno stanje meteoroloških spremenljivk konsistentno prilagaja novim opazovanjem (Strajnar, 2012a). Takšna analiza nato služi kot začetni pogoj za izvedbo časovne integracije meteoroloških enačb – napovedi. Podatki Mode-S eksperimentalno vstopajo v model podobno kot drugi letalski podatki.

Predpriprava meritev. V prejšnjih razdelkih smo navedli, da so meritve Mode-S v povprečju zelo kakovostne. Kljub temu pa nad pojavljanjem različnih letal v zračnem prostoru okoli Slovenije in nad stanjem njihovih senzorjev nimamo kontrole. Lahko bi se zgodilo, da bi letalo z neoptimalno kalibriranimi ali nedelujočimi senzorji z napačnimi meritvami vneslo napake v začetne pogoje za simulacijo vremena. Zato smo set podatkov Mode-S v obdobju dveh let primerjali z analizami modela ALADIN nad Slovenijo ter tako na podlagi povprečnih odstopanj določili seznam letal, ki jih lahko upoštevamo pri analizi vremena. Podatke tudi časovno gladimo v obdobju 12 sekund (4 meritve) med vzletom in pristankom ter ene minute med letom na konstantni višini.

Vpliv na napoved. Vpliv opazovanj Mode-S na napoved vremena je bil ocenjen na podlagi trimesečnega asimilacijskega cikla zaporednih analiz triurnih napovedi. Daljše napovedi, namenjene verifikaciji, so bile izdelane vsakih šest ur. Te napovedi smo primerjali z napovedmi enakega referenčnega eksperimenta brez Mode-S. Na podlagi verifikacije s kasnejšimi meritvami Mode-S smo ugotovili, da je vpliv opazovanj na območje z radijem 270 km okoli letališča pozitiven (slika 5). Napovedi temperature in vetra so bile izboljšane do časovne dolžine tri ure, pri čemer je pozitiven vpliv na temperaturo v najnižjih delih ozračja do 12 ur.



Slika 5: Vpliv uporabe opazovanj Mode-S na napako kratkoročnih napovedi za različne meteorološke spremenljivke (koren srednjega kvadratnega odklona, angl. RMSE). Negativne vrednosti predstavljajo zmanjšanje, pozitivne pa povečanje napake. Vertikalna koordinata je zračni pritisk.

Lahko ugotovimo, da meritve Mode-S izboljšujejo predvsem zelo kratkoročno napoved vremena, kar med drugim pomeni, da je uporaba podatkov že zdaj potencialno uporabna v letalstvu. Po obdobju nekaj ur se lokalni vpliv zaradi advekcije z zračnimi tokovi izgubi. Poudariti velja še, da je

bil eksperiment pripravljen v obdobju avgust–oktober. V zimskem času zaradi bolj stabilnega vremena in temperaturnih inverzij pričakujemo vpliv na večje dolžine napovedi. K večjemu vplivu na napoved bi seveda pripomogli podatki dodatnih radarjev Mode-S v regiji.

4 SKLEP

Opisali smo vzpostavitev celotnega sistema za posredovanje in obdelavo vremenskih podatkov, ki jih vremenska tipala na letalih prek radarjev Mode-S posredujejo v kontrolo zračnega prometa Slovenije, ta pa naprej v Agencijo Republike Slovenije za okolje, kjer so nato vključeni v numerični meteorološki model ALADIN za napovedovanje vremena. Da bi upravičili to povezavo, smo morali najprej pokazati, da so tako pridobljene vremenske meritve zanesljive in primerljive z drugimi viri vremenskih podatkov (Strajnar, 2012b; Hrastovec & Solina, 2013). Tako kot smo na začetku našega projekta pričakovali, je večje število bolj prostorsko razpršenih vremenskih meritev izboljšalo vremenske napovedi.

Sistem po tehnološki plati sploh ni zahteven. Potrebna so bila le minimalna vlaganja za samo tehnološko raven posredovanja podatkov. Računalniški sistem, na katerem teče model ALADIN, pa je bilo treba prilagoditi dodatnim vhodnim podatkom. Več ovir pri uporabi teh vremenskih podatkov je lahko pri vzpostavljanju potrebnega medinstitucionalnega sodelovanja, pri čemer pa je bila relativna majhnost slovenskega prostora tokrat za nas prednost. Prepričani smo, da se bo po našem zgledu uporaba vremenskih podatkov, ki izvirajo iz radarjev Mode-S, že kmalu razširila v mednarodnem prostoru.

V letošnjem letu pričakujemo po eno nadgradnjo radarja na Mode-S v Sloveniji in v Avstriji. Obstajajo dobre možnosti, da bomo z obeh tudi lahko dobivali letalske vremenske meritve. To bo vsaj potrojilo količino meritev in omogočilo primerjavo in dodatno kontrolo kakovosti.

5 LITERATURA IN VIRI

- [1] AMDAR. (2003). Aircraft meteorological data relay (AMDAR) reference manual (Computer software manual No. 958).
- [2] Hrastovec, M., & Solina, F. (2013). Obtaining meteorological data from aircraft with Mode-S radars. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 28 (12), 12–24. doi: 10.1109/MAES.2013.6693664.
- [3] ICAO. (1995, July). Aeronautical telecommunications annex 10 (First ed., Vol. III) [Computer software manual].
- [4] Schwartz, B., & Benjamin, S. G. (1995). A comparison of temperature and wind measurements from ACARS-equipped aircraft and rawinsondes. *Weather and Forecasting*, 10, 528–544. Objavljeno na: http://ruc.noaa.gov/AMB_Publications_bj/1995_Schwartz_A_Comparison_of_Temperature_and_Wind_Measurements_from_ACARS-Equipped_Aircraft_and_Rawinsondes.pdf.
- [5] Strajnar, B. (2012a). Analiza vremena z lokalno asimilacijo opazovanj. *Vetrnica, glasilo Slovenskega meteorološkega društva*, 4.
- [6] Strajnar, B. (2012b). Validation of Mode-S meteorological routine air report aircraft observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117 (D23). Objavljeno na <http://dx.doi.org/10.1029/2012JD018315> doi: 10.1029/2012JD018315.